

IDENTIFICAÇÃO DE DANO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM TRELIÇAS DE AÇO

Genasil F. dos Santos^a, José G. S. da Silva^b, Francisco J. da C. P. Soeiro^b e Antônio J. da S. Neto^c

^a*Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, genasil@hotmail.com*

^b*Departamento de Estruturas e Fundações, ESTR, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, jgss@uerj.br, soeiro@uerj.br*

^c*Instituto Politécnico, IPRJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Nova Friburgo/RJ, Brasil, asjneto@iprj.uerj.br*

Keywords: Danos em Estruturas, Otimização, Análise de Sensibilidade, Trelças de Aço.

Abstract. Sistemas estruturais nas suas mais variadas aplicações, nas quais podem ser incluídos veículos espaciais, automóveis e estruturas de engenharia civil tais como prédios, pontes e plataformas “off-shore”, acumulam dano durante suas vidas úteis. Em muitas situações, tal dano pode não ser visualmente observado. Do ponto de vista da segurança e do desempenho da estrutura é desejável monitorar esta possível ocorrência, localizar e quantificar tal dano. Isto pode ser feito utilizando métodos de identificação de sistemas que, em geral, podem ser classificados numa categoria de técnicas de avaliação não-destrutivas. O uso de dados experimentais tais como frequências naturais, modos de vibração e deslocamentos estáticos, e um modelo analítico estrutural, podem permitir a identificação dos parâmetros de uma estrutura danificada. As propriedades estruturais de um modelo analítico, inicialmente considerado sem dano, são modificadas sucessivamente para minimizar a diferença entre os dados obtidos pelo modelo e a resposta medida experimentalmente. Esse processo pode ser definido como um problema inverso que é resolvido através de um problema de otimização onde os danos dos elementos da estrutura são as variáveis de projeto e a função objetivo é o erro, descrito anteriormente, a ser minimizado. A metodologia de análise desenvolvida foi aplicada sobre o projeto de treliças de aço planas. Assim sendo, neste trabalho de pesquisa é realizada uma análise de sensibilidade no problema de otimização, visando identificar as barras das treliças metálicas investigadas que terão seus possíveis danos mais facilmente detectados.

1 INTRODUÇÃO

Os componentes de sistemas estruturais sofrem, ao longo de sua vida, alterações que normalmente são dependentes de fatores ambientais e das cargas às quais estão submetidos. Estas alterações, denominadas danos, podem levar ao comprometimento desses componentes. É fundamental que tais danos sejam identificados e avaliados no que concerne às suas localizações e intensidades. Falhas nestas estruturas podem levar a prejuízos materiais e até mesmo a perda de vidas em casos extremos. É desejável que se faça um acompanhamento da evolução destes danos de forma que possíveis medidas preventivas sejam propostas e implementadas (Santos, 2009).

Uma falha estrutural na forma de uma trinca macroscópica, por exemplo, pode ser facilmente identificada; porém, mudanças microscópicas que prejudicam as propriedades mecânicas da estrutura não são fáceis de observar, tornando-se então uma abordagem que permita a detecção e correção deste dano antes que a estrutura seja realmente comprometida.

O aparecimento do dano, em função de sobrecargas, tensões, ou fadiga, induz a perda de rigidez estrutural, tal fato foi observado em inúmeros trabalhos experimentais, que concluíram que tanto as respostas estáticas, quanto dinâmicas e modais podem ser utilizadas na detecção de danos (Soeiro e Hajela, 1990 e 1992; Roy et al., 2005; Fraraccio et al., 2008).

Na análise de sensibilidade podem-se estabelecer inúmeros aspectos relacionados à formulação de problemas inversos (Beck et al., 1985). Na engenharia, inúmeros trabalhos fazem referência à análise de sensibilidade como pode ser visto na área de transferência radiativa (Knupp et al., 2009) e na área de estruturas (Wang e Chen, 1999; Kala, 2006; Parente Jr. e Souza Jr, 2008; Santos, 2009).

2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Uma maneira de se comprovar a veracidade de um modelo analítico é através da comparação da resposta prevista pelo modelo com a observada em testes ou durante a operação. Embora medidas experimentais sejam em si imprecisas devido à presença de erros inerentes ao tipo de equipamento e à inexatidão das técnicas de aquisição de dados, limites razoáveis podem ser estabelecidos dentro dos quais os dados experimentais devem estar situados. Neste caso, se há suficiente confiança nos dados experimentais, as técnicas de identificação de sistemas podem ser utilizadas para o aperfeiçoamento do modelo analítico.

As técnicas de identificação de sistemas podem ter diferentes classificações. Dentre as formulações que podem ser empregadas, destaca-se o método do erro na saída (“output error approach”). A maioria das pesquisas em identificação de sistemas se situa nesta categoria, uma vez que o modelo existe e apenas os parâmetros serão modificados para haver concordância entre resultados analíticos e experimentais. A forma analítica da função objetivo que minimiza a diferença quadrática pode ser definida pela Eq. (1), onde $x(t)$ é obtido pelo modelo analítico e $x_m(t)$ é a resposta medida experimentalmente, no domínio do tempo, em um dado intervalo de tempo $[0, T]$.

$$F = \int_0^T (x_m(t) - x(t))^2 dt \quad (1)$$

Na formulação de elementos finitos, as características de uma estrutura são definidas em termos das matrizes de rigidez, $[K]$, amortecimento, $[C]$, e massa, $[M]$. Quaisquer variações nessas matrizes, como as que seriam introduzidas por um dano, afetam a resposta da estrutura.

Se os deslocamentos estáticos forem utilizados para identificação, o modelo envolverá apenas a matriz de rigidez, como sugere a Eq. (2), onde x é um vetor com os deslocamentos obtidos a partir de cargas estáticas aplicadas P .

$$[K]x = P \quad (2)$$

Se o modelo analítico representa o problema de autovalores e autovetores para um sistema sem amortecimento, este pode ser descrito em termos das matrizes de rigidez e massa, mencionadas acima e definido pela Eq. (3), onde ω_i representa o i -ésimo autovalor (frequência natural) e X_i é o correspondente autovetor (modo de vibração).

$$([K] - \omega_i^2 [M])X_i = 0 \quad (3)$$

As matrizes $[K]$ e $[M]$ podem ser convenientemente ajustadas para minimizar as diferenças entre os autovetores medidos experimentalmente e os obtidos pelo modelo analítico descrito acima. Tipicamente a matriz de rigidez pode ser expressa em termos das propriedades de seção reta dos diversos elementos como a área, A , e os momentos de inércia, I e J_t . Existe também uma dependência das dimensões dos elementos como a espessura t e comprimento L , além das propriedades do material representadas pelos módulos de elasticidade longitudinal e transversal, respectivamente, E e G , de acordo com a Eq. (4).

$$[K] = [t, L, A, E, EI, GJ_t] \quad (4)$$

No presente trabalho de pesquisa, somente as mudanças que ocorrem na matriz de rigidez serão consideradas para configuração de dano. Essas alterações, que podem ocorrer em qualquer dos termos das propriedades que compõem a rigidez de cada elemento, serão condensadas em uma única variável de dano denominada, d_i , que será usada para multiplicar a matriz de rigidez de cada elemento. Limites inferiores e superiores (0: componente estrutural sem dano e 1: elemento estrutural totalmente danificado) foram devidamente estabelecidos para as variáveis de dano, d_i . Desta forma, a matriz de rigidez do elemento finito de treliça será modificada para incorporar a variável de dano, ao longo da análise numérica, de acordo com a Figura 1 e Eq. (5), onde $C = \cos \alpha$ e $S = \sin \alpha$.

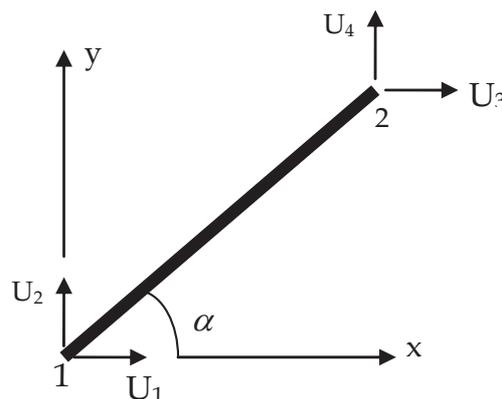


Figura 1: Representação de um elemento finito de treliça plano.

$$K_i^{(.)} = \frac{(1-d_i)E_i A_i}{L_i} \begin{bmatrix} C^2 & CS & -C^2 & -CS \\ CS & S^2 & -CS & -S^2 \\ -C^2 & -CS & C^2 & CS \\ -CS & -S^2 & CS & S^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Se os deslocamentos estáticos ou modos de vibração, medidos experimentalmente $Y_{m,n}$ ou obtidos analiticamente $Y_{a,n}$, o problema de otimização resultante pode ser definido como determinar o vetor de variáveis de projeto d_i que minimiza a função objetivo escalar que representa a diferença quadrática entre a resposta analítica e a experimental, conforme apresentado na Eq. (6), onde i representa o grau de liberdade de cada nó de cada barra e nd é a quantidade de valores experimentais.

$$F = \sum_{n=1}^{nd} |Y_{m,n} - Y_{a,n}|^2 \quad (6)$$

3 FORMULAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Na análise de sensibilidade procura-se determinar o efeito da variação de uma determinada variável em relação à função objetivo. Pode ser um instrumento útil em diferentes áreas da engenharia para determinar a importância de uma variável em relação a outra. A estimativa de parâmetros e um exame dos coeficientes de sensibilidade de uma função podem prover consideráveis informações de um problema, que permite identificar as variáveis que terão maior sucesso em sua determinação. É evidente que qualquer objeto de estudo de tem sempre um fator de incerteza e na análise de sensibilidade é buscado minimizar essas influências.

Os coeficientes de sensibilidade representam a primeira derivada da função objetivo em relação a cada variável de projeto. Tal informação pode ser relevante em qualquer projeto. Quando ocorrem pequenos valores correlacionados com outro parâmetro, a análise de sensibilidade do problema pode ser dificultada e muito suscetível a erros. Como em todo problema de otimização o ideal é se realizar uma análise de sensibilidade antes de se aplicar a metodologia de identificação de danos em estruturas (Kleiber et al., 1997). No caso de detecção de danos em estruturas os coeficientes de sensibilidade são definidos como:

$$S_i \equiv \frac{\partial F(d_i)}{\partial d_i} \quad (7)$$

Na Eq. (7), $F(d_i)$ representa o valor da função objetivo descrita na Eq. (6), d_i é o dano de cada barra do sistema e S_i representa os coeficientes de sensibilidade. Para determinação dos coeficientes de sensibilidade, os danos de cada elemento serão alterados em 1%, enquanto que os demais elementos serão mantidos inalterados sem dano. Essa configuração permitirá avaliar a função objetivo em termos de cada elemento alterado. Deste modo será possível compilar todas essas informações em um gráfico " S_i x d_i " (Fator de sensibilidade *versus* Dano no elemento), de maneira que seja possível indicar quais as barras da estrutura que podem influenciar significativamente a função objetivo.

4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM TRELIÇAS DE AÇO PLANAS

Nesta seção é apresentada a análise de sensibilidade das barras de duas treliças planas a partir dos deslocamentos estáticos dos seus nós. Esses deslocamentos, produzidos por carregamentos estáticos, são sintéticos, ou seja, são determinados utilizando o método dos elementos finitos na estrutura danificada. Nesta análise de sensibilidade serão avaliadas as diferenças entre os valores estáticos analíticos da estrutura íntegra (sem danos) com valores produzidos por danos inseridos nas barras. Em cada avaliação, será observada apenas uma barra corrompida por vez, desta forma cada barra danificada analiticamente deverá indicar um novo valor na função objetivo, essa diferença de valores indica quanto o dano em tal barra influencia no valor daquela função.

4.1 Treliça metálica com 10 barras

O primeiro objeto de estudo deste trabalho é uma treliça de aço com 10 barras. O sistema estrutural é composto por dez barras e seis nós. As barras do modelo possuem 12 cm² de seção transversal e são compostas por um aço com 205 GPa de módulo de elasticidade. Uma força de 10kN é aplicada sobre o nó 2 da treliça em estudo, de acordo com a Figura 2.

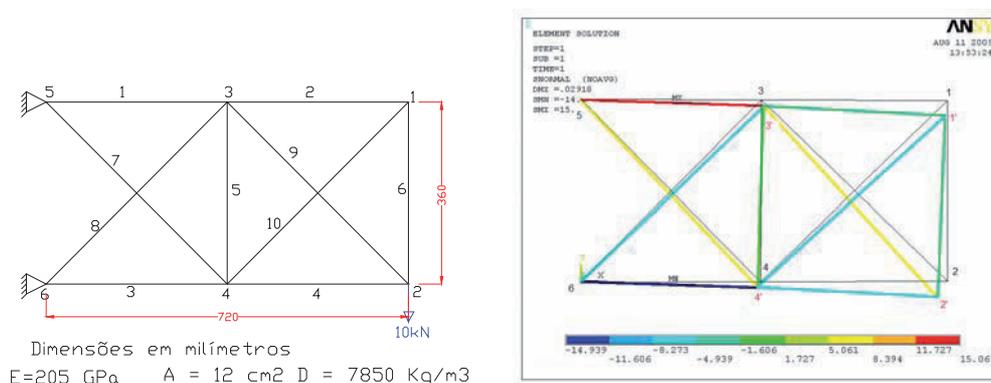


Figura 2: Treliça de 10 barras.

Na parte esquerda da Figura 2 é mostrado o modelo estrutural representativo da treliça de 10 barras, com a numeração de suas barras, numeração de seus nós e, ainda, as propriedades físicas das barras (área da seção transversal, módulo de elasticidade e massa específica). Na parte da direita da Figura 2 apresenta-se a análise de tensões das barras da treliça investigada, onde verifica-se na legenda desta figura que as barras na cor azul estão comprimidas, enquanto que as barras cujas cores tendem a ficar avermelhadas estão tracionadas. Observa-se que a barra 1 da treliça é a mais tracionada enquanto que a barra 3 é a mais comprimida, conforme ilustrado na Figura 2. Na Figura 2 também é possível verificar a deformada da estrutura em relação a sua condição inicial indeformada.

A estrutura foi modelada com base no emprego do programa computacional ANSYS (ANSYS, 2005). Na Tabela 1, são mostrados os valores dos esforços normais em cada barra, obtidos mediante análise estática. Destacam-se as barras 1 e 3, que são, respectivamente, a barra mais tracionada e a mais comprimida, no que tange ao carregamento estático aplicado, conforme apresenta do na Figura 2.

Treliça com 10 Barras	
Barras da Treliça	Esforço Normal (kN)
1	15,061
2	4,476
3	-14,939
4	-5,524
5	-0,434
6	4,476
7	6,986
8	-7,157
9	7,812
10	-6,330

Tabela 1: Esforços nas barras do modelo estrutural investigado.

As informações utilizadas nesta análise de sensibilidade foram os deslocamentos nodais da estrutura, obtidos mediante análise estática. Observando-se a Figura 3 é possível perceber que a sensibilidade apresentada pelos elementos 1 e 3 é maior que a dos demais (percentualmente comparada). Tal indicação permite avaliar que possíveis influências, ou alterações de danos nesses elementos oferecerão maiores alterações sobre a resposta da estrutura.

De maneira inversa a esta análise, pode-se concluir que possíveis danos presentes nestas barras terão uma maior facilidade de serem identificados. Deste modo, no gráfico da esquerda da Figura 3 é ilustrada a sensibilidade de cada barra normalizada pela barra que apresentou maior sensibilidade (em função de porcentagens). No gráfico da direita da Figura 3, a sensibilidade é mostrada em valores absolutos.

Verifica-se que cada alteração, em cada barra, registrou um valor diferente para a resposta da estrutura. Nas barras 1 e 3 foram detectadas as maiores sensibilidades à alteração de danos enquanto que nas barras 2, 4, 5 e 6 não foram detectadas sensibilidades significativas. Uma outra forma para analisar-se a sensibilidade do modelo é descrita pela Tabela 2, onde cada elemento tem seu fator de sensibilidade definido pela da Eq. (7).

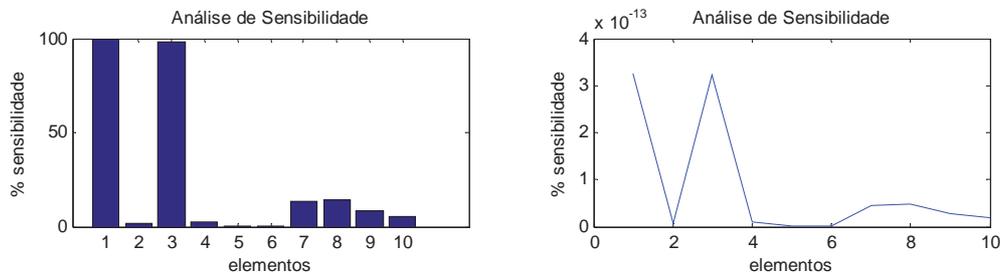


Figura 3: Sensibilidade dos elementos da treliça de 10 barras.

Treliça com 10 Barras	
Barras da Treliça	$S_i \equiv \frac{\partial F(d_i)}{\partial d_i}$
1	$0,3269 \times 10^{-12}$
2	$0,0059 \times 10^{-12}$
3	$0,3217 \times 10^{-12}$
4	$0,0089 \times 10^{-12}$
5	$0,0000 \times 10^{-12}$
6	$0,0018 \times 10^{-12}$
7	$0,0447 \times 10^{-12}$
8	$0,0469 \times 10^{-12}$
9	$0,0280 \times 10^{-12}$
10	$0,0184 \times 10^{-12}$

Tabela 2: Coeficientes de sensibilidade para a treliça de 10 barras.

4.2 Treliça de aço com 14 barras

A treliça de aço de 14 barras é composta por quatorze elementos e nove nós. As barras do modelo possuem 12 cm^2 de seção transversal e são compostas por um aço com 205 GPa de módulo de elasticidade. Quatro forças de 10kN são aplicadas sobre o nós 3, 5, 7 e 9 da estrutura, de acordo com a Figura 4.

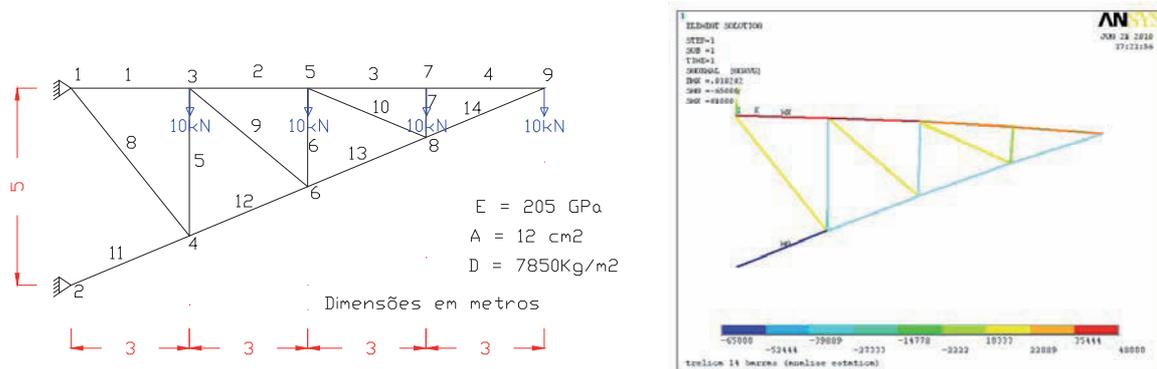


Figura 4: Treliça metálica composta por 14 barras.

Na parte esquerda da Figura 4 é mostrado o modelo estrutural representativo da treliça de 14 barras, com a numeração de suas barras, numeração de seus nós e, ainda, as propriedades físicas das barras (área da seção transversal, módulo de elasticidade e massa específica). Na parte da direita da Figura 4 apresenta-se a análise de tensões das barras da treliça investigada, onde verifica-se na legenda desta figura que as barras na cor azul estão comprimidas, enquanto que as barras cujas cores tendem a ficar avermelhadas estão tracionadas. Observa-se que os elementos 1 e 2 da treliça são os elementos mais tracionados enquanto que a barra 11 é a mais comprimida, conforme ilustrado na Figura 4.

Na Figura 4 foi apresentado o resultado da análise dos esforços resultantes em cada barra da treliça, a fim de identificar quais são as barras mais solicitadas para o carregamento estático aplicado sobre o modelo. A estrutura foi modelada com base no emprego do programa computacional ANSYS (ANSYS, 2005). Na Tabela 3, são ilustrados os valores dos esforços normais em cada barra, obtidos a partir de uma análise estática. Destacam-se, na presente análise, as barras 1 e 11, que são, respectivamente, a barra mais tracionada e a mais comprimida, no que tange ao carregamento aplicado. Na seqüência, a Figura 5 é apresentada o resultado da análise de sensibilidade.

Treliça com 10 Barras	
Barras da Treliça	Esforço Normal (kN)
1	48000
2	36000
3	24000
4	24000
5	-20000
6	-15000
7	-10000
8	19209
9	15620
10	13000
11	-65000
12	-52000
13	-39000
14	-26000

Tabela 3: Esforços nas barras do modelo estrutural em estudo.

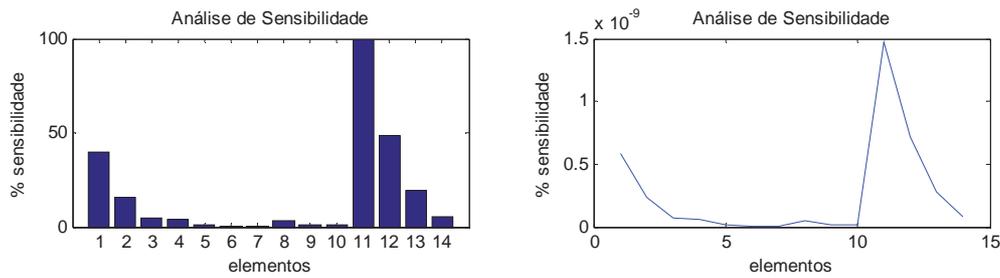


Figura 5: Sensibilidade dos elementos da treliça de 14 barras.

Na parte esquerda da Figura 5 ilustra-se a sensibilidade de cada barra da estrutura normalizada pela barra que apresentou a maior sensibilidade (em função de porcentagens). Na parte da direita da Figura 5, a sensibilidade é mostrada em valores absolutos. Verifica-se, ainda, conforme no caso investigado anteriormente, associado a treliça de 10 barras, Figura 2, que cada alteração, em cada barra, registrou um valor diferente para a resposta da estrutura. Nas barras 1, 11 e 12 foram detectadas as sensibilidades mais elevadas em relação a alteração de danos. Por outro lado, as barras 3 até 10 foram pouco sensíveis. A seguir, uma outra forma para analisar-se a sensibilidade do modelo é descrita pela Tabela 4, onde cada elemento tem seu fator de sensibilidade definido pela da Eq. (7).

Treliça com 10 Barras	
Barras da Treliça	$S_i \equiv \frac{\partial F(d_i)}{\partial d_i}$
1	0,0584 x 10⁻⁸
2	0,0234 x 10 ⁻⁸
3	0,0068 x 10 ⁻⁸
4	0,0059 x 10 ⁻⁸
5	0,0021 x 10 ⁻⁸
6	0,0004 x 10 ⁻⁸
7	0,0000 x 10 ⁻⁸
8	0,0045 x 10 ⁻⁸
9	0,0018 x 10 ⁻⁸
10	0,0011 x 10 ⁻⁸
11	0,1476 x 10⁻⁸
12	0,0719 x 10⁻⁸
13	0,0283 x 10 ⁻⁸
14	0,0081 x 10 ⁻⁸

Tabela 4: Coeficientes de sensibilidade para a treliça de 14 barras.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa apresentou a análise de sensibilidade em um problema de detecção de danos. Foram utilizadas treliças de planas de aço submetidas a carregamentos estáticos. Verificou-se que os membros mais solicitados dos modelos estruturais investigados (treliças com dez e quatorze barras) apresentaram coeficientes de sensibilidade mais elevados. Tal fato sugere que os elementos mais solicitados, cujos danos terão efeito mais devastador no comportamento global da estrutura, provavelmente terão esses possíveis danos mais facilmente detectados, o que favorece a questão associada a segurança de um projeto

estrutural. Por outro lado, o desenvolvimento e aplicação da presente metodologia de análise, objetivando o estudo de sistemas estruturais com um número maior de graus de liberdade segue como uma continuação deste trabalho, uma vez que os resultados obtidos, até o presente momento, apresentaram-se bastante promissores.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, 2nd edition, 2005.
- Beck, J.V., Blackwell, B. e St. Clair Jr., C.R., *Inverse heat conduction. III-Posed problems*, JohnWiley & Sons, New York, USA, 1985.
- Fraraccio, G., Brügger, A. e Betti, R., Identification and damage detection in structures subjected to base excitation, *Experimental Mechanics Journal*, 48:521-528, 2008.
- Kala, Z., Sensitivity analysis of fatigue behaviour of steel structures under in-plane bending, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 11(1):33-45, 2006.
- Kleiber, M., Antunez, H., Hien, T. e Kowalczyk, P., *Parameter sensitivity in non-linear mechanics. theory and finit element computations*, John wiley & Sons, New York, 1997.
- Knupp, D.C., Silva Neto, A.J. da e Sacco, W.F., Radiative properties estimation with the particle collision algorithm based on a sensitivity analysis, *High Temperatures-High Pressures*, 38:137-151, 2009.
- Parente Jr. E. e Souza Jr., J.B.M., Design sensitivity analysis of nonlinear structures subjected to thermal loads, *Computers and Structures*, 86:1369-1384, 2008.
- Roy, S., Chakraborty, S. e Sarkar, S. K., Identification of locations and magnitude of damage in existing structure from measured natural frequencies and mode shapes, Department of Civil Engineering, Bengal Engineering and Science University, IE (I) Journal CV, 2005.
- Santos, G.F. dos, Identificação de danos estruturais utilizando técnicas de otimização, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2009.
- Soeiro, F.J. da C.P. e Hajela, P., Structural damage detection based on static and modal analysis, *AIAA Journal*, 28(6): 1110-1115, 1990.
- Soeiro, F.J. da C.P. e Hajela, P., Locating damage in a truss structure using identification techniques: an experimental investigation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, XVI(2): 119-134, 1992.
- Wang, Z. e Chen, S. (1999), "Sensitivity analysis of eigenmodes and dynamic responses for intelligent structures", *Finite Elements in Analysis and Design* 33 71-81.